



(19) BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

(12) **Offenlegungsschrift**
(10) **DE 100 14 197 A 1**

(51) Int. Cl.⁷:
H 01 B 12/00
H 01 L 39/16
H 02 H 9/02

(21) Aktenzeichen: 100 14 197.8
(22) Anmeldetag: 22. 3. 2000
(43) Offenlegungstag: 27. 9. 2001

DE 100 14 197 A 1

(71) Anmelder:
ABB Research Ltd., Zürich, CH

(74) Vertreter:
Zimmermann & Partner, 80331 München

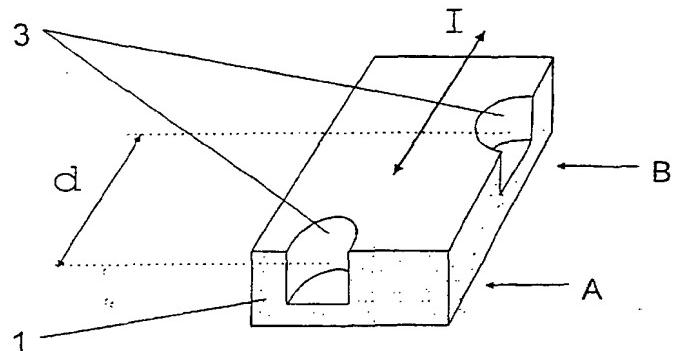
(72) Erfinder:
Chen, Makan, Baden-Dättwil, CH; Paul, Willi,
Wettingen, CH

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:
DE 197 48 483 C1
JP Patents Abstracts of Japan:
5- 22855 A;
5-226707 A;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Hochtemperatursupraleiteranordnung

(57) Die vorliegende Erfindung hat eine Hochtemperatursupraleiteranordnung zum Gegenstand, welche insbesondere zur Verwendung in Strombegrenzern geeignet ist. Über die gesamte Länge des Supraleiters (1) verteilte Schwachstellen (A, B) agieren als potentielle Hot-Spots und ermöglichen im Fehlerfall ein homogenes Quenching des Supraleiters. Die Schwachstellen sind durch eine reduzierte kritische Stromdichte oder eine Verringerung des Leiterquerschnitts charakterisiert.



DE 100 14 197 A 1

Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Hochtemperatursupraleiter. Sie betrifft eine Hochtemperatursupraleiteranordnung gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

STAND DER TECHNIK

Hochtemperatursupraleiter finden beispielsweise Verwendung in supraleitenden Kurzschluss-Strombegrenzern für elektrische Verteil- oder Übertragungsnetze. Bei einem solchen Strombegrenzer wird ausgenutzt, dass ein Supraleiter bei entsprechend tiefer Temperatur seine Supraleitfähigkeit nur solange beibehält, als die Stromdichte eines ihn durchflossenden Stromes unterhalb eines gewissen Grenzwertes bleibt. Dieser Grenzwert wird herkömmlich als kritische Stromdichte (j_c) bezeichnet und ist grundsätzlich abhängig von der Temperatur des Supraleiters und dem ihn durchsetzenden Magnetenfeld.

Allgemein muss für Anwendungen von Hochtemperatursupraleitern bei hohen elektrischen Leistungen die Problematik der sogenannten "Hot-Spots" gebührend berücksichtigt werden. Infolge von unvermeidlichen Materialinhomogenitäten im Supraleiter oder wegen lokalen thermischen Fluktuationen ist die kritische Stromdichte nicht über den ganzen Supraleiter konstant. Folglich wird im Kurzschlussfall bei der anfänglichen Zunahme des Kurzschlussstromes die Stromdichte an der schwächsten Stelle des Supraleiters die lokale kritische Stromdichte zuerst überschreiten. An dieser Stelle des Supraleiters beginnt sich also ein Spannungsabfall aufzubauen. Dabei wird Joule'sche Wärme erzeugt, welche den Supraleiter in einem kleinen Bereich aufheizt und die Supraleitung lokal zusammenbrechen lässt. Wird die dissipierte Energie nicht rasch genug weggeführt, entsteht ein Hot-Spot welcher letztendlich zu einer Zerstörung des Supraleiters führt.

Bei elektrischen Verteil- oder Übertragungsnetzen mit supraleitenden Bauteilen fällt im Fehlerfall unter Umständen die am entsprechenden Netzabschnitt anliegende Spannung gewollt (falls das Bauteil als Strombegrenzer ausgelegt ist) oder ungewollt am Supraleiter ab. Bei einem idealen Hochtemperatursupraleiter mit perfekt konstanter kritischer Stromdichte j_c und uniformer Stromverteilung wird letzterer im Kurzschlussfall homogen über seine ganze Länge "quench", d. h. sich über die kritische Temperatur T_c erwärmen und in den resistiven Zustand übergehen. Dadurch fällt die Spannung über die ganze Länge des Supraleiters ab, was zu kleinen elektrischen Feldern und entsprechend unterkritischen Energiedichten führt.

Bei Tieftemperatursupraleitern ist die Gefahr einer lokalen Beschädigung des Supraleiters durch Ausbildung eines Hot-Spots viel geringer. Dies deshalb, weil bei Tieftemperatursupraleitern die supraleitenden Filamente in eine Matrix mit hoher Wärmeleitfähigkeit eingebaut sind. Dank der entsprechend erhöhten Ausbreitungsgeschwindigkeit eines angehenden Hot-Spots (einige hundert m/s) ist eine lokal begrenzte Aufheizung des Supraleiters praktisch ausgeschlossen.

Erste Abhilfe bietet zumindest ein elektrischer Bypass, welcher über die ganze Länge eines Hochtemperatursupraleiters mit diesem in elektrischem Kontakt steht und somit parallel zu jedem potentiellen Hot-Spot liegt. Der elektrische Bypass stellt einen alternativen Strompfad dar, durch welchen der Kurzschlussstrom den Hot-Spot umgehen kann, wodurch die Spannungsverteilung homogenisiert

wird. In der DE 197 46 976 A1 ist ein derartiger elektrischer Bypass offenbart.

- Der elektrische Bypass ist typischerweise eine Schicht aus einem auch bei Wärmebehandlungen gegenüber dem 5 Hochtemperatursupraleiter inertem Edelmetall wie Silber oder Gold. Um die Begrenzungseigenschaften des betrachteten Strombegrenzers nicht einzuschränken, darf der Bypasswiderstand pro Länge nicht zu klein sein. Die genannte Schicht darf also nicht zu gut leiten, oder muss einen entsprechend geringen Querschnitt aufweisen. Der vom Hot-Spot übernommene Kurzschlussstrom wird auch im Bypass Joule'sche Wärme erzeugen, wodurch sich auch der elektrische Bypass mehr oder weniger schnell aufheizt und letztendlich Schaden nimmt.
- 10 Aus dem Artikel von B. Gromoll et al., "Resistive Current Limiters with YBCO Films", IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 7 No. 2, 1997, p 828-831, sind Dünnschicht-Hochtemperatursupraleiteranordnungen bekannt. Ein Substrat dient dabei als Unterlage für eine dünne 15 Schicht (Dicke $\approx 1 \mu\text{m}$) aus einem keramischen Hochtemperatursupraleitermaterial, insbesondere einer Verbindung mit der chemischen Formel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ mit einer kritischen Stromdichte von 10^6 A/cm^2 .

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, bei einer Hochtemperatursupraleiteranordnung die Ausbildung von Hot-Spots zu verhindern und ein homogenes Quenching des Supraleiters zu erreichen. Diese Aufgabe wird durch eine Hochtemperatursupraleiteranordnung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Kern der Erfindung ist es, über eine Länge des Supraleiters verteilt künstlich Schwachstellen mit einer reduzierten 35 kritischen Stromstärke vorzusehen. Diese Schwachstellen fungieren als potentielle Hot-Spots, bei denen im Fehlerfall die kritische Stromstärke im Wesentlichen gleichzeitig überschritten wird. Ausgehend von diesen Stellen erwärmt sich darauf der gesamte Supraleiter auf homogene Art und Weise.

In einer ersten Ausführungsform erfolgt die Reduktion der kritischen Stromstärke über eine Verringerung des Supraleiterquerschnitts bei ansonsten unveränderter kritischer Stromdichte respektive Materialbeschaffenheit.

In einer zweiten Ausführungsform erfolgt die Reduktion der kritischen Stromstärke über eine Verringerung der kritischen Stromdichte, indem lokal Defekte oder Materialinhomogenitäten in den Supraleiter eingebracht werden.

Die erfundungsgemäßen Schwachstellen eignen sich zum 50 Schutz von Dünnschicht-Hochtemperatursupraleiteranordnungen gegen die Ausbildung von Hot-Spots, insbesondere im Zusammenhang mit supraleitenden Strombegrenzern.

Weitere vorteilhafte Ausführungsformen gehen aus den abhängigen Patentansprüchen hervor.

KURZE BESCHREIBUNG DER FIGUREN

Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit den Zeichnungen 60 näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 eine Hochtemperatursupraleiteranordnung gemäss einer ersten Ausführungsform der Erfindung, und

Fig. 2 eine Hochtemperatursupraleiteranordnung gemäss einer bevorzugten weiteren Ausführungsform der Erfindung.

Die in der Zeichnung verwendeten Bezugszeichen sind in der Bezugszeichenliste zusammengefasst. Grundsätzlich sind gleiche Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

In **Fig. 1** ist ein Abschnitt eines bandförmigen Hochtemperatursupraleiters **1** gezeigt, welcher in der angegebenen Richtung von einem Strom der Stromstärke I durchflossen wird. An den mit A und B bezeichneten Schwachstellen ist die kritische Stromstärke I_C , d. h. die über den Leiterquerschnitt senkrecht zur Stromflussrichtung integrierte kritische Stromdichte, verringert. Der Abstand in Stromflussrichtung zwischen den Schwachstellen A, B ist mit d bezeichnet. Jede Schwachstelle A, B umfasst mindestens einen Defekt **3**. Gemäß einer ersten Ausführungsform ist bei den Schwachstellen A, B der Querschnitt des Supraleiters **1** reduziert, indem im Innern oder am Rand der Anordnung Supraleitermaterial entfernt wurde. Die Defekte **3** sind in diesem Falle Aussparungen, welche sich möglicher- aber nicht notwendigerweise über die ganze Dicke des Supraleiters **1** erstrecken.

Gemäß einer zweiten Ausführungsform ist an den Schwachstellen die kritische Stromstärke I_C verringert durch eine Reduktion der kritischen Stromdichte j_C . Dies kann wahlweise über den ganzen Leiterquerschnitt oder nur über Teile davon erfolgen. Ein entsprechender Defekt mit reduziertem j_C kann sich also über den ganzen Querschnitt erstrecken. Eine lokale Änderung der Stöchiometrie beispielsweise durch den Einbau von Fremdatomen ("Doping") oder Bestrahlung des Supraleitermaterials führt i. A. zu einer Änderung von j_C .

Im erstgenannten Falle einer vollständigen Unterdrückung der supraleitenden Eigenschaften kann das ausgesparte Supraleitermaterial durch einen anderen Leiter oder einen Nichelleiter ersetzt sein. In **Fig. 2** ist ein Abschnitt einer Hochtemperatursupraleiteranordnung gezeigt, bei welcher der Hochtemperatursupraleiter **1** in elektrischem Kontakt mit einem elektrischen Bypass **2** steht. An den mit A, B, C, D bezeichneten Schwachstellen ist die kritische Stromstärke I_C , d. h. die über den Querschnitt der Anordnung integrierte kritische Stromdichte, verringert, indem das Supraleitermaterial durch Material des Bypass ersetzt wurde.

Steigt infolge eines Kurzschlusses die Stromstärke I im Supraleiter **1** an, wird sie zuerst an den wie dargelegt präparierten Stellen A, B den dortigen kritischen Wert I_C überschreiten. Sofern die Defekte **3** eine vergleichbare Reduktion von I_C bewirken, geschieht dies gleichzeitig oder zumindest innerhalb einer tolerierbaren zeitlichen Verzögerung Δt . An den Schwachstellen beginnt also verteilt über die Länge des ganzen Supraleiters **1** die Energiedissipation. Dabei ist es ohne Bedeutung, ob bei einer Schwachstelle mit reduzierter kritischer Stromdichte j_C die Erwärmung primär vom eigentlichen Defekt **3** oder vom restlichen Teil des Querschnitts mit unverändertem j_C ausgeht. Die dabei erzeugte Wärme vermag trotz einer bescheidenen Wärmeleitfähigkeit der Supraleiteranordnung auch benachbarte Gebiete innert nützlicher Frist zu erreichen und aufzuwärmen. Diese Schwachstellen **3** bilden also potentielle Hot-Spots, wobei gerade die Tatsache, dass in geringem Abstand untereinander eine Vielzahl davon vorhanden ist, verhindert, dass sich eine einzelne Schwachstelle zu einem veritablen Hot-Spot entwickelt und den Supraleiter schädigt.

Zur weiteren Unterstützung eines homogenen Quenches ist es vorteilhaft, einen guten thermischen Leiter in Kontakt mit dem Supraleiter **1** vorzusehen. Somit kann die bei den Schwachstellen erzeugte Wärme noch schneller propagieren und auf angrenzende Gebiete weitergeleitet werden. Für viele Anwendungen liegt der Supraleiter in Form eines Bandes oder Drahtes vor, die Erfindung lässt sich aber auch bei einem geeignet gekrümmten, d. h. nicht planaren Supraleiter einsetzen.

Bei der Ausgestaltung der Defekte **3** ist zu beachten, dass der Nennstrom I_N gleich oder kleiner als die minimale kritische Stromstärke I_C^{min} sein soll. Eine zu grosse Absenkung letzterer bedeutet also eine inakzeptable Einschränkung der Stromtragfähigkeit im Normalbetrieb. Bevorzugterweise dominieren die absichtlich eingebauten Schwachstellen die inhärenten Schwachstellen des Materials, d. h. die potentiellen Hot-Spots des Supraleiters **1**. Die Reduktion der kritischen Stromstärke I_C im Bereich der Schwachstellen sollte also die unvermeidliche Variation von I_C im restlichen Bereich des Supraleiters übertreffen. Falls mit einer natürlichen I_C -Variation von 5% gerechnet werden muss, bringt eine Absenkung um weniger als 10% bereits den gewünschten Effekt.

- 15 Bevorzugt sind die Schwachstellen unter einem mittleren Abstand d über die ganze Länge der Anordnung verteilt vorgesehen. Sie sind untereinander mehr oder weniger einheitlich ausgebildet, so dass sie alle innerhalb einer maximalen Verzögerung Δt quenchten, d. h. in den resistiven Zustand übergehen. Die von den Schwachstellen ausgehenden Wärmefronten erreichen idealerweise innerhalb der genannten Zeitspanne Δt jeden Punkt des Supraleiters **1**. Somit erwärmt sich letzterer innerhalb kurzer Zeit nach Auftreten des Kurzschlussstromes über seine ganze Länge. Bei einer 20 Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärmefront von v m/s ist der Abstand der Schwachstellen vereinfacht durch $d \approx 2 \cdot v \cdot \Delta t$ festgelegt. Ausbreitungsgeschwindigkeit v und maximale Verzögerung Δt hängen vom Aufbau und Material der Supraleiteranordnung ab, zudem ist Δt von der gewählten 25 Anwendung abhängig. Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit v von 5 m/s, wie sie für die im folgenden Abschnitt dargestellten Anordnungen zutreffend ist, und einer Verzögerung Δt von 1 ms ergibt sich für d eine akzeptable Größenordnung im cm-Bereich. Dergegenüber sollten die Schwachstellen beziehungsweise die Defekte **3** in Stromflussrichtung in etwa eine Ausdehnung im μm -Bereich haben.

- Dünnsschicht-Hochtemperatursupraleiteranordnungen wie eingangs erwähnt umfassen ein normalerweise polykristallines, untexturiertes Substrat, beispielsweise aus Saphir, eine qualitativ hochwertige dünne supraleitende Schicht und dazwischen eine möglicherweise texturierte Pufferschicht. Die Pufferschicht stimmt in ihren thermomechanischen Eigenschaften, insbesondere dem Wärmeausdehnungskoeffizienten, mit dem Hochtemperatursupraleiter gut überein. Zur Aufbringung der Pufferschicht und der supraleitenden Schicht werden beispielsweise PVD (Physical Vapor Deposition) oder CVD (Chemical Vapor Deposition) Prozesse verwendet. Das Aufwachsen der supraleitenden Schicht erfolgt beispielsweise durch thermische Co-Verdampfung (co-evaporation) oder mittels eines Laserablations-verfahrens. Die Dicke der dargestalt präparierten supraleitenden Schicht beträgt bis 5 μm .

- 55 Die genannten Verfahren zur Aufbringung einer dünnen supraleitenden Schicht erlauben im Zusammenwirken mit einer geeigneten Maskentechnik gleichzeitig die Ausgestaltung der Schwachstellen mit der erforderlichen Genauigkeit beziehungsweise Reproduzierbarkeit. Andererseits können auch nach erfolgter Deposition mittels Ätzverfahren die Aussparungen gemäß der ersten Ausführungsform auf kontrollierte Weise erstellt werden. Dabei wird anschließend an die Deposition des Supraleiters **1** eine Maskenschicht aus einem geeigneten Photoresist aufgebracht. Durch Öffnungen in der Maske hindurch wird anschließend durch ein übliches Materialabtragverfahren wie z. B. Sputterätzen die darunterliegende supraleitende Schicht **1** zumindest teilweise abgetragen. Nach dem Entfernen der Maske wird anschließend zur Fertigstellung der Dünnsschicht-Hochtemperatursu-

praleiteranordnung ganzflächig eine Bypassschicht 2 (z. B. aus Ag oder Au) aufgetragen.

BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Supraleiter
- 2 Bypass
- 3 Defekt
- A, B, C Schwachstelle

Patentansprüche

1. Hochtemperatursupraleiteranordnung mit einem Supraleiter (1) und einer Stromflussrichtung (I), dadurch gekennzeichnet, dass in Stromflussrichtung (I) über den Supraleiter (1) verteilt Schwachstellen (A, B, C, D) mit einer gegenüber dem Rest des Supraleiters (1) reduzierten kritischen Stromstärke I_c vorgeschen sind. 15
2. Hochtemperatursupraleiteranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine Schwachstelle (A, B, C, D) eine Verringerung eines stromtragenden Querschnitts des Supraleiters (1) aufweist. 20
3. Hochtemperatursupraleiteranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine Schwachstelle (A, B, C, D) Inhomogenitäten oder Defekte (3) im Supraleiter (1) aufweist. 25
4. Hochtemperatursupraleiteranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Anordnung weiter einen elektrischen Bypass (2) umfasst und dass zumindest eine Schwachstelle (A, B, C, D) einen verminderten Querschnitt des Supraleiters (1) und einen im gleichen Mass vergrösserten Querschnitt des Bypass (2) aufweist. 30
5. Hochtemperatursupraleiteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Reduktion der kritischen Stromstärke I_c im Bereich der Schwachstellen (A, B, C, D) grösser ist als die Variation der kritischen Stromstärke I_c in einem zwischen zwei Schwachstellen (A, B, C, D) liegenden Bereich des Supraleiters (1). 35
6. Hochtemperatursupraleiteranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Hochtemperatursupraleiter (1) als dünne Schicht auf ein Substrat aufgebracht ist. 40
7. Hochtemperatursupraleiteranordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die supraleitende Schicht (1) aus einem keramischen Hochtemperatursupraleiter, insbesondere aus einer Verbindung gemäss der Formel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, besteht. 45
8. Verwendung einer Hochtemperatursupraleiteranordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche in einem supraleitenden Strombegrenzer. 50

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

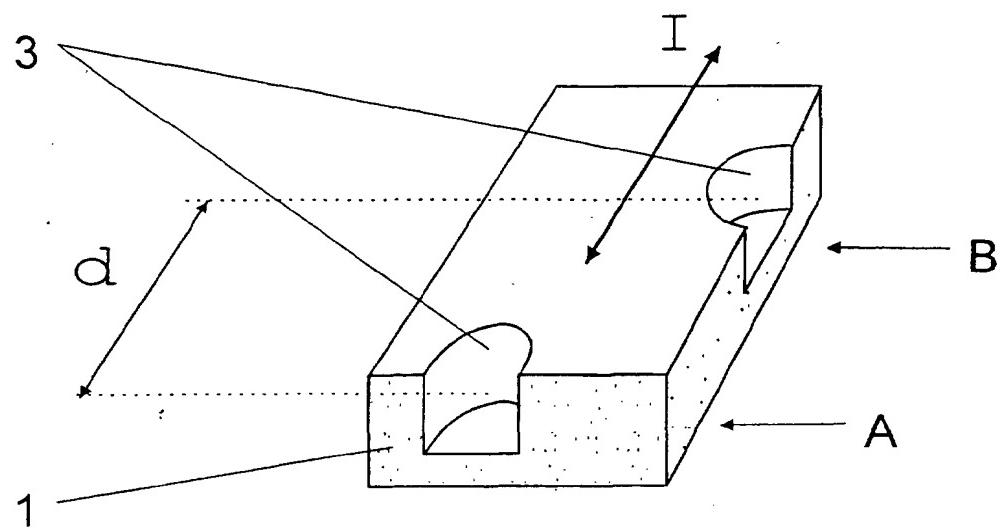


Fig. 1

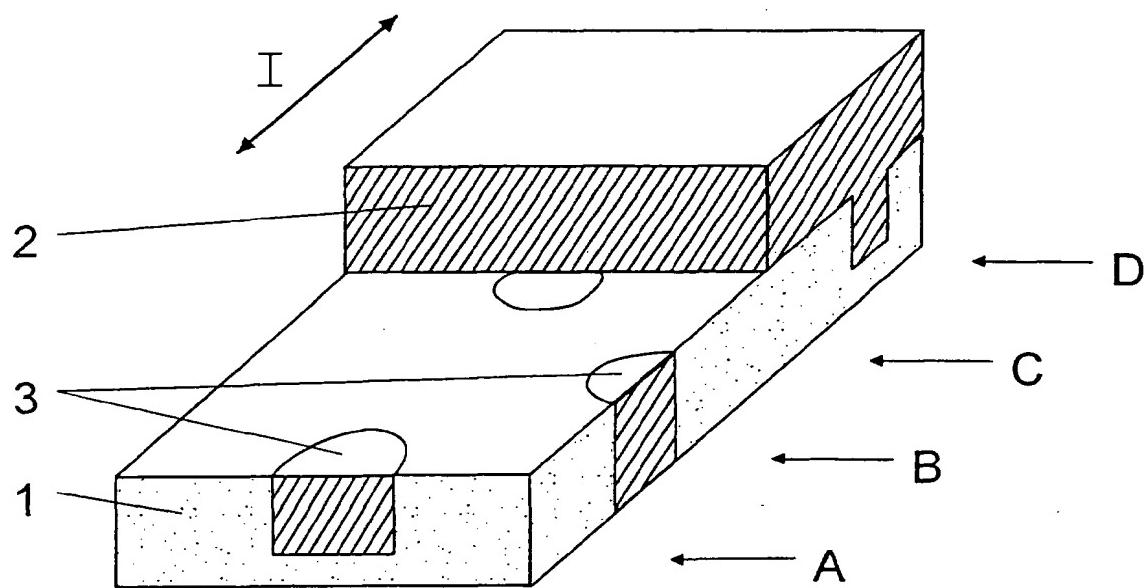


Fig. 2